

东南大学电工电子实验中心

实 验 报 告

课程名称： 模拟电子电路实验

第九次实验

实验名称： 音响电路设计实验

院（系）： 电气工程学院 专 业： 电气工程及其自动化

姓 名： 王皓冬 学 号： 16022627

实 验 室： 401 实验组别：

同组人员： 实验时间： 2024年 5 月 28 日，
6 月 4 日

评定成绩： 审阅教师：

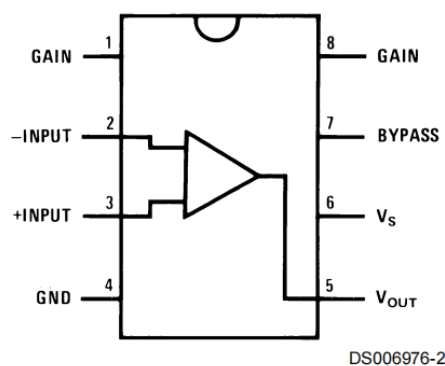
一、实验目的

- (1) 掌握音响放大系统的设计方法和调试方法;
- (2) 掌握基本单元电路的设计、实验测量过程、性能分析等实验内容;
- (3) 掌握由多个单元电路构成模拟电子系统的方法;
- (4) 理解电子系统中有大小信号时的布局走线方式,电源的滤波处理等。

二、实验原理

1、基本概念

集成功率放大器 LM386——广泛用于音响、电视和小电机的驱动,使用方法原则上与集成运放相同,注意极限参数(功耗、最大允许电源电压等)放大倍数可以从 20 (26dB) 到 200 (46dB) 之间调整。



三、预习思考:

1. 实验内容

运放工作电压为士 12V。通过调整电位器 R_w , 可以调整不同的参考电压值。

设计一个音响放大系统,要求对接人的背景音乐信号和话筒输入信号进行调节和混响,放大到足够的功率后在喇叭上播放。

电路实现的功能与技术指标如下:

(1)基本要求

功能要求:有两路输入,分别为话筒输入与 Line 输入,音量单独可调;两路信号混合并放大,由音量电位器控制输出功率的大小。

额定功率:不小于 0.5 W(失真度 $THD \leq 10\%$)。

负载阻抗:8 Ω 。

频率响应: $f_L \leq 50$ Hz, $f_H \geq 20$ kHz。

输入阻抗:不小于 20 k Ω 。

话筒输入:不大于 5 mV。

(2)提高要求

音调控制特性:1kHz 处增为 0dB,125Hz 和 8kHz 处有 ± 12 dB 的调节范围。

(3)创新发挥

设计完成一套完整的双声道简易卡拉 OK 功放系统。

2. 实验要求

(1)根据实验内容,技术指标及实验室现有条件,自选方案设计原理图,分析工作原理,计算元件参数。

(2)利用 Multisim 软件进行仿真,并优化设计。

(3)实际搭试所设计电路,使之达到设计要求。

(4)按照设计要求对调试好的硬件电路进行测试,记录测试数据,分析电路性能指标。

(5)撰写实验报告。

1. 报告说明

报告格式说明

对本实验报告所涉及到的格式进行说明。

表格: 表头部分边框 1.5 磅黑色实线, 字体小五黑体加粗; 数据部分小五宋体;

流程框图: 采用 draw.io 绘图, 200%分辨率, png 格式导出;

正文字体: 五号宋体, 重点部分斜体加粗。实验要求部分为群青色字;

公式: LaTeX 编码, 默认格式;

数字与字母: TimesNewRoman 字体。

符号说明

对本项目中涉及的标识作如下说明。

A_i : 第 i 级放大电路的电压增益。其中, A_1 、 A_2 为 MIC 单独输入 (混音前) 的放大器电压增益;

u_{on} : 第 n 级放大电路的电压输出与信号源输入电压的关系表达式;

u_{i1} : MIC 输入电压信号;

u_{i2} : Line In 输入电压信号。

2. 电路设计与仿真

增益分配

因为设计任务要求在 8Ω 负载上的输出功率为 $0.5W$, 所以对应的输出电压为:

$$U_o = \sqrt{P_o R_L} = 2V$$

而话筒(MIC)的输出信号一般只有 $5mV$ 左右, 则

$$A_u = \frac{2000}{5} = 400$$

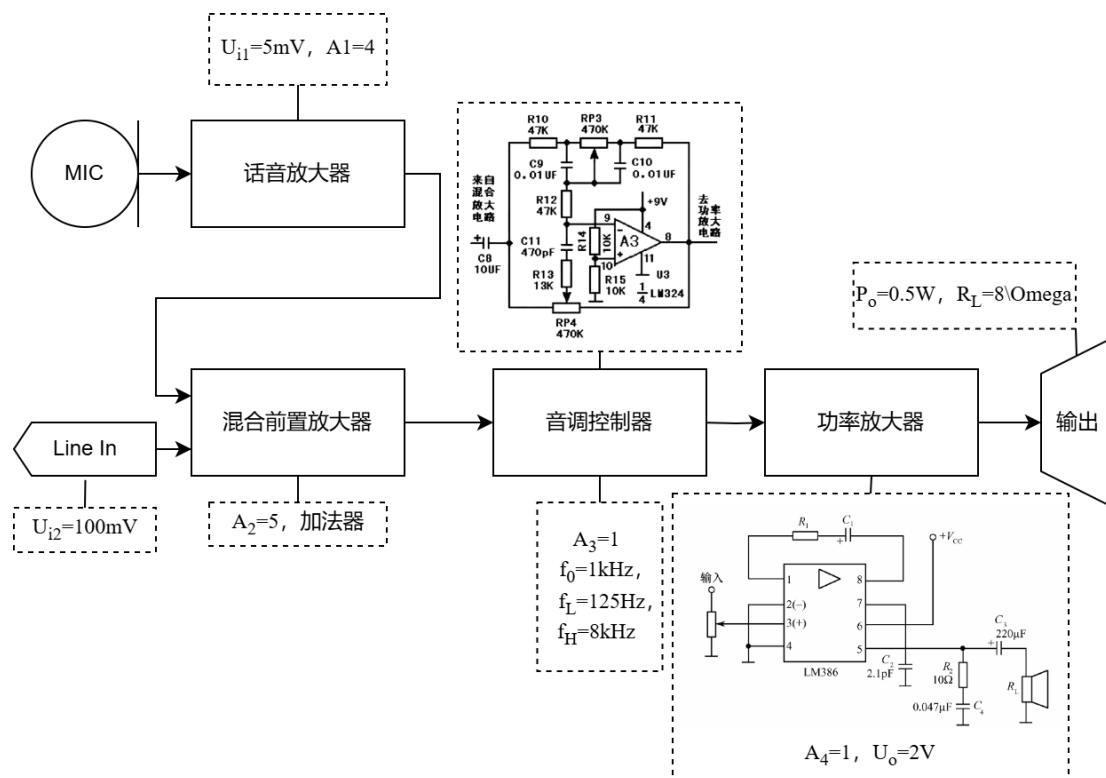
上式表示: 为了达到设计任务要求的输出功率, 从话筒输入端需要总放大倍数大于 400 倍。实际电路放大倍数则应略大于 400 倍。

MP3 或手机的输出信号一般在 $50\sim 100mV$ 之间, 如以 $50mV$ 计算, 为了达到输出功率的要求, 需要总共放大 40 倍左右。

根据以上分析, 选取增益分配如流程框图中标注。

项目流程图

本项目中的项目流程图及设计指标如图所示。



其中，音调控制器是由利用带通滤波器实现的，功率放大器是集成芯片 LM386。

话筒放大器是针对话筒(MIC)的输出信号比较小而设置的小信号放大器，其目的是放大话筒信号使其在信号幅度上提高到和音乐信号(Line In)相当的值；混合前置放大器的功能是将已经放大的话筒信号和音乐信号相加，使两路信号合成为一个信号；音调控制器的作用是对混合后的信号进行高低频调整，以更好的实现原音重现或满足不同听者的爱好；通过功率放大电路，将信号功率放大到足以推动喇叭，实现放大的信号输出。

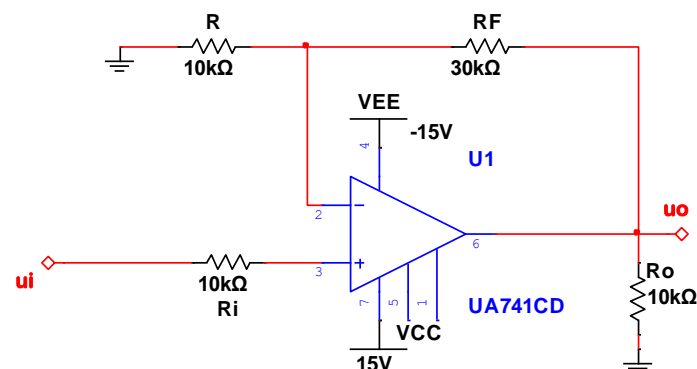
话筒放大器

话筒放大器模块设计如下。

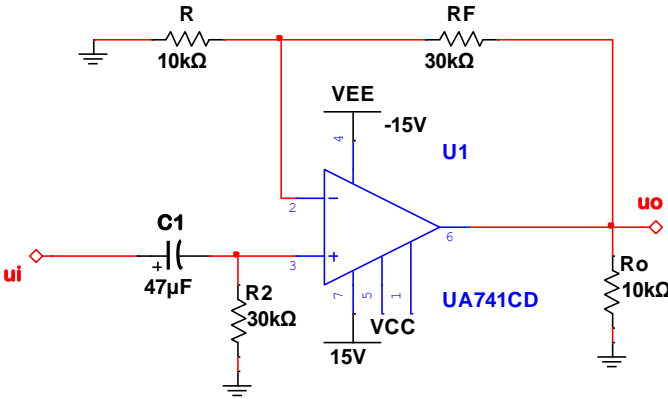
首先，应当明确的是，MIC 信号与 LINE 信号的电压传输特性应具有相同的极性。由于在混合前置放大电路的加法器中，无论是采用同向加法电路还是反向加法电路，二者极性均相同，因此**话筒放大器不能改变MIC 信号的极性**。由于要产生 $A_1 = 4$ 的放大倍数，必须采用同向比例放大电路，选取参数为

$$A_1 = 1 + \frac{R_F}{R} = 4$$

取参数为 $R_F = 30k\Omega$ 、 $R = 10k\Omega$ ，则所得电路如图。



其中， R_o 是为模拟负载所引入的电阻。由于电路中可能存在一定谐波，添加滤波电容后所得高通滤波电路如下。



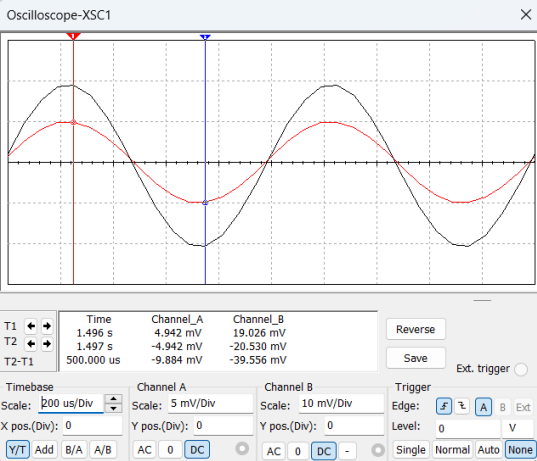
由耦合电容 C_1 和电阻 R_1 确定了该单元电路的下限截止频率,即:

$$f_{L1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = 0.11\text{Hz} < 50\text{Hz}$$

满足设计要求。

仿真验证如下。输入端输入一个 $f=1\text{kHz}$ 、幅值 $V_p=5\text{mV}$ 的电压信号，用示波器测量输入端及输出端的波形。（红-mic，黑-输出）

（由于 Multisim 信号源仿真不支持以有效值为单位，且仿真时仅有放大倍数的区别，因此所有仿真均采用幅值代替有效值以验证放大倍数）



可以看到，输出为一**不失真的正弦波**，其幅值约为 20mV，放大倍数近似满足 **4 倍关系**。

此部分的电压传输特性为

$$u_{o1} = 4u_{i1}$$

混合前置放大电路

混合前置放大电路设计如下。

该电路的作用是叠加两路声信号，以达到“混音”的效果。因此，采用**反向加法电路**来实现这种效果。

反向加法电路的理论输出电压为

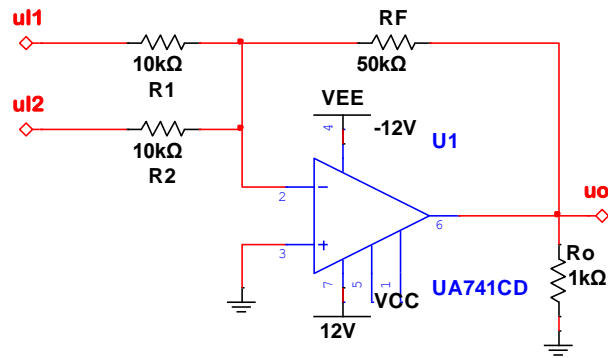
$$u_o = -\frac{R_F}{R_1} \cdot u_1 - \frac{R_F}{R_2} \cdot u_2$$

其中，依设计， $\frac{R_F}{R_1} = A_2 = 5$ ， $\frac{R_F}{R_2} = 5$ 。

选取参数为 $R_1 = 10k\Omega$ ， $R_2 = R_F = 50k\Omega$ ，则混合前置放大电路的电压输出为

$$u_{o2} = -5 \cdot A_1 u_{i1} - 5 u_{i2}$$

所得电路原理图如下。



其中， R_o 是为模拟负载所引入的电阻。

仿真验证如下。输入端输入一个 $f=1kHz$ 、幅值 $V_p=20mV$ 的电压信号，用示波器测量输入端及输出端的波形。（红-输入，黑-输出）（上-mic_In，下-Line_In）

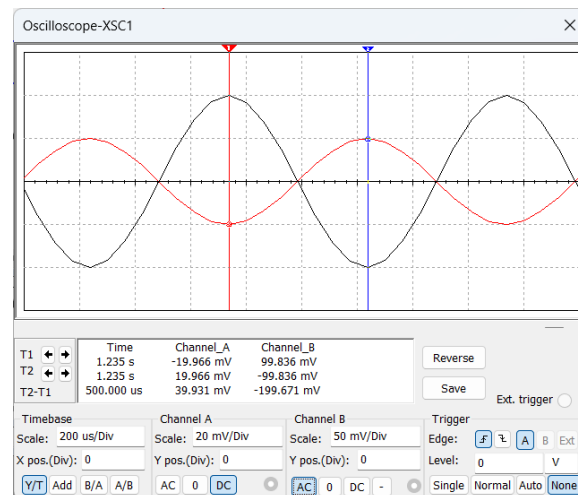


图 1 mic_in

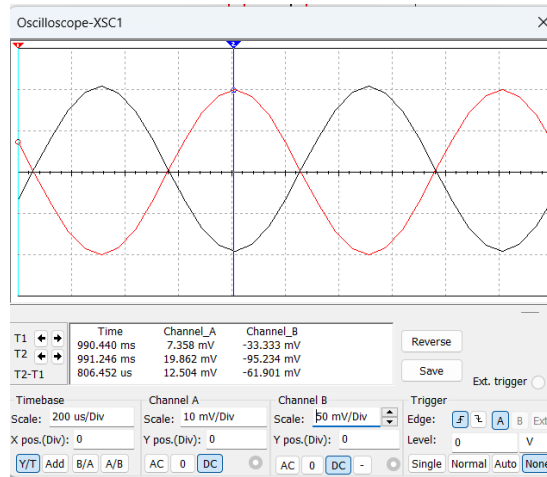


图 2 Line_In

可以看到，输出为一**不失真的正弦波**，mic_In 输出的幅值约为 100mV，放大倍数近似满足**5 倍关系**；Line_In 输出的幅值约为 95mV，放大倍数近似满足**5 倍关系**。

此部分的电压传输特性为

$$u_{o2} = -5 \cdot (A_1 u_{i1} + u_2)$$

音调控制器

音调控制器电路设计如下。

信号在低频区时，电路的理论参数

$$A_{UA} = \frac{R_1 + R_{W2}}{R_2}$$

$$A_{UB} = \frac{R_2}{R_1 + R_{W2}}$$

$$f_{L1} = \frac{1}{2\pi R_{W2} C_2}$$

$$f_{L2} = \frac{R_1 + R_{W2}}{2\pi R_{W2} C_2}$$

信号在高频区时，令 $R_1 = R_2 = R_3 = R$ ，电路的理论参数

$$A_{UC} = \frac{R_4 + 3R}{R_4}$$

$$A_{UD} = \frac{R_4}{R_4 + 3R}$$

$$f_{H1} = \frac{1}{2\pi C_3 (R_4 + 3R)}$$

$$f_{H2} = \frac{1}{2\pi C_3 R_4}$$

可以看到，**一定有 $f_{L1} < f_{L2}$, $f_{H1} < f_{H2}$** 。因此，应当分别取

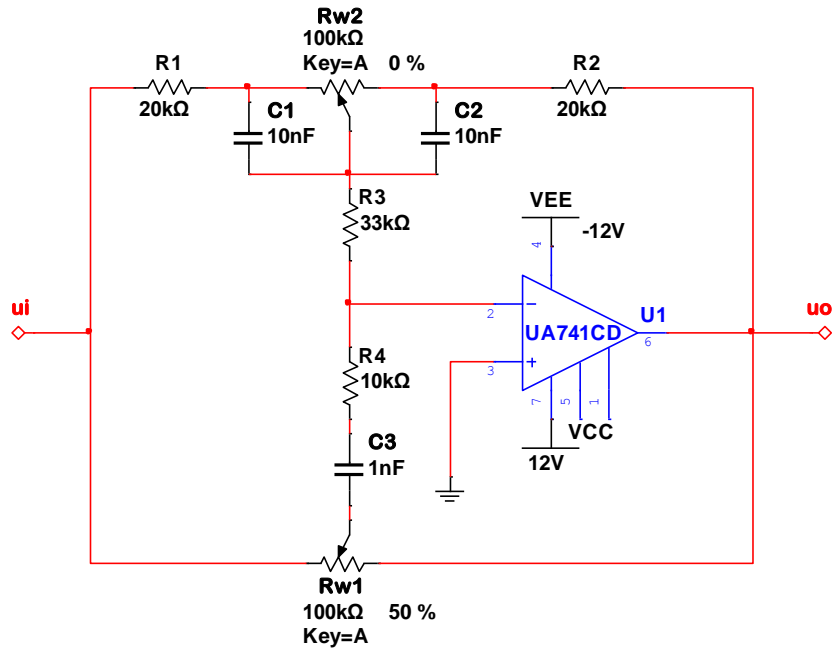
$$\begin{cases} f_L = f_{L1} \\ f_H = f_{H2} \end{cases}$$

作为电路的通频特性。则应使参数满足理论值

$$\begin{cases} f_L = \frac{1}{2\pi R_{W2} C_2} = 125\text{Hz} \\ f_H = \frac{1}{2\pi C_3 R_4} = 8\text{kHz} \end{cases}$$

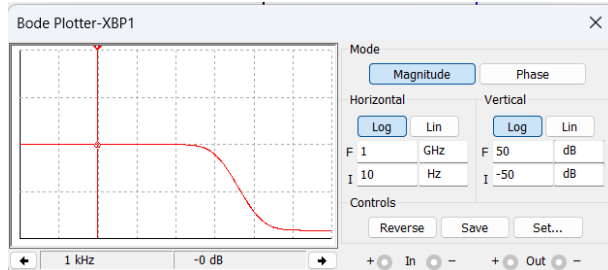
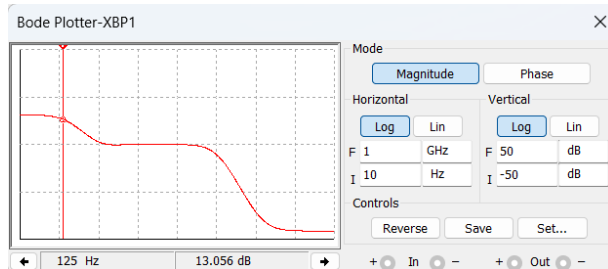
且中频带频率 $f_M = 1\text{kHz}$ 。

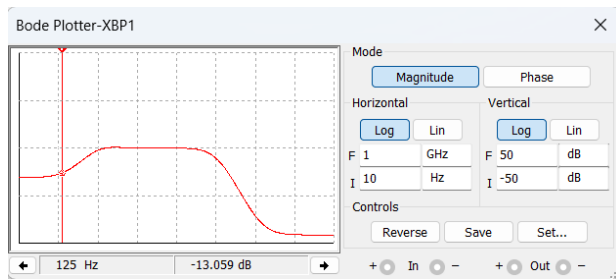
选取参数为 $R_1 = R_2 = 20\text{k}\Omega$, $C_1 = C_2 = 10\text{nF}$, $R_3 = 33\text{k}\Omega$, $R_4 = 10\text{k}\Omega$, $C_3 = 1\text{nF}$ 。



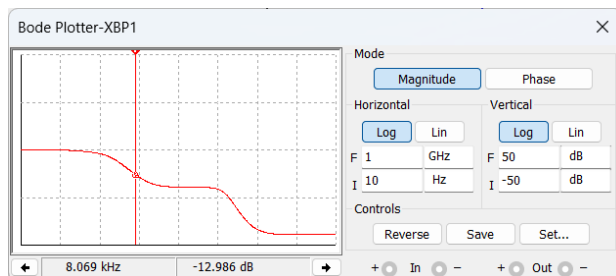
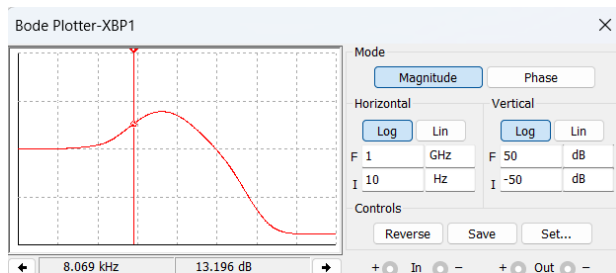
仿真验证如下。输入端输入一个 $f=1\text{kHz}$ 、幅值 $V_p=20\text{mV}$ 的电压信号，用波特仪分别测量不同电位器取值时 u_i 、 u_o 间的幅频特性曲线，记录特征点频率。

(从上至下分别为 $R_{W2} = 0\%$ 、 $R_{W2} = 50\%$ 、 $R_{W2} = 100\%$)





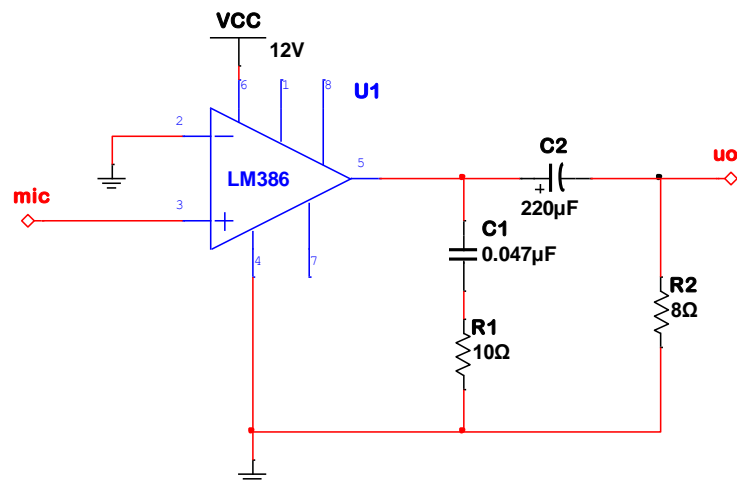
(从上至下分别为 $R_{W1} = 0\%$ 、 $R_{W1} = 100\%$)



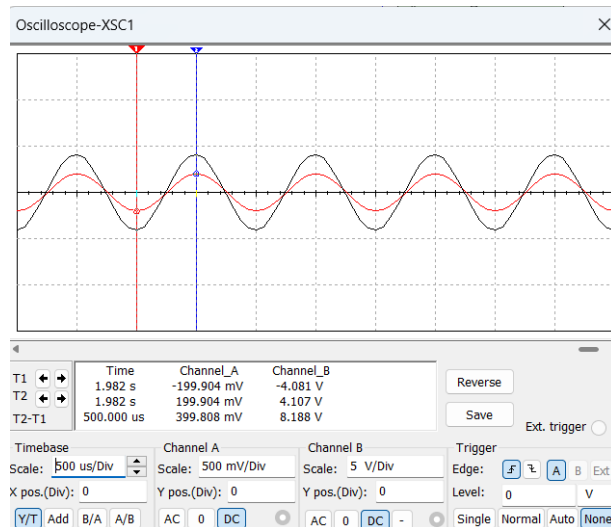
可以看到，仿真满足电路设计。

功率放大器

功率放大器电路设计如下。



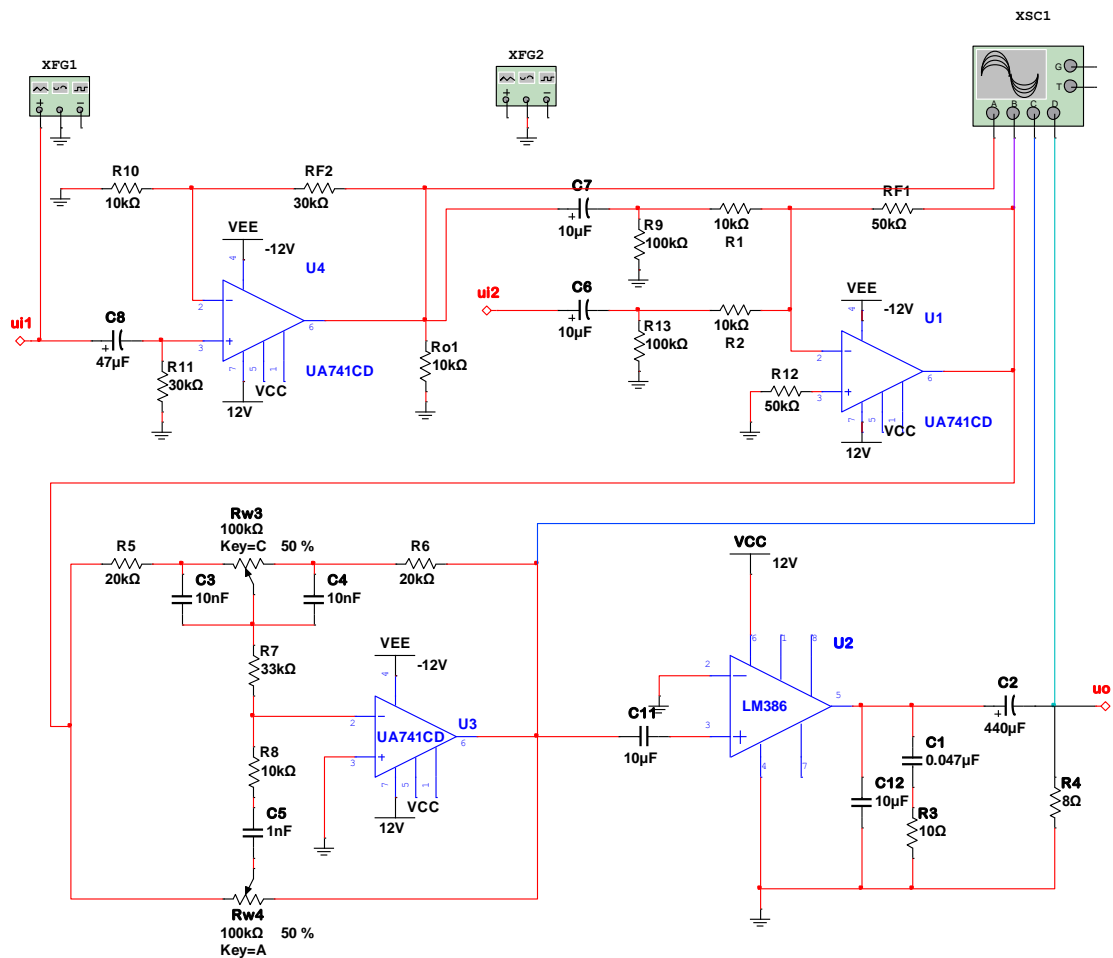
仿真验证如下。在 mic 口输入一个 $f=1\text{kHz}$ 、幅值 $V_p=200\text{mV}$ 的电压信号，用示波器测量 mic 端及输出端的波形。(红-mic，黑-输出)



可以看到，输出为一**不失真的正弦波**，其幅值约为 4.1V，放大倍数近似满足 **20 倍**关系。

总电路

总电路连接如下。

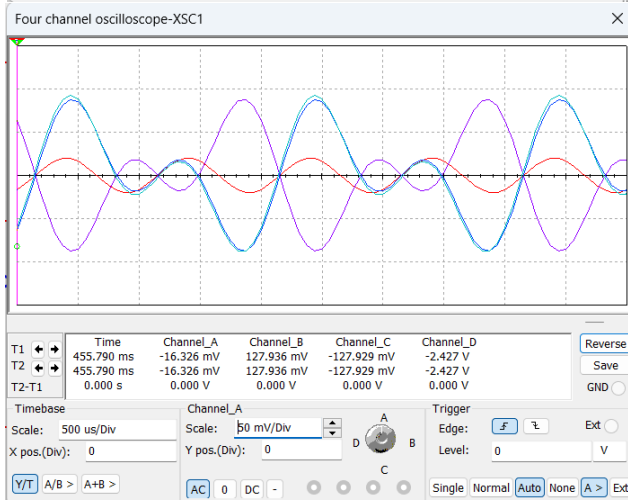
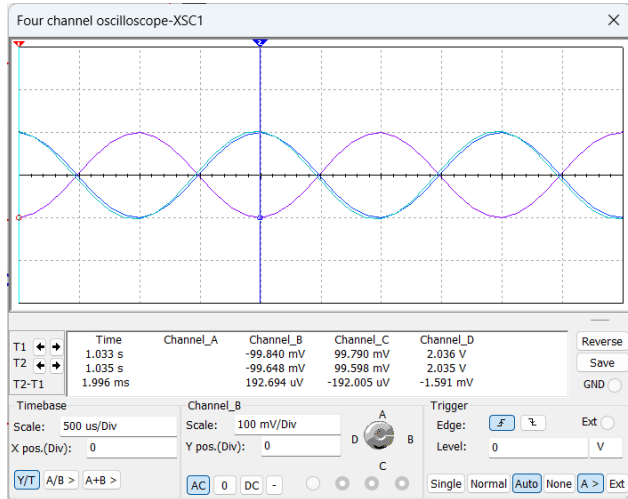
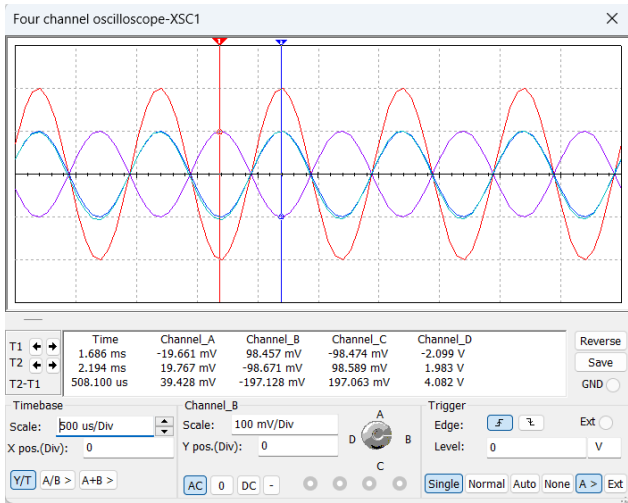


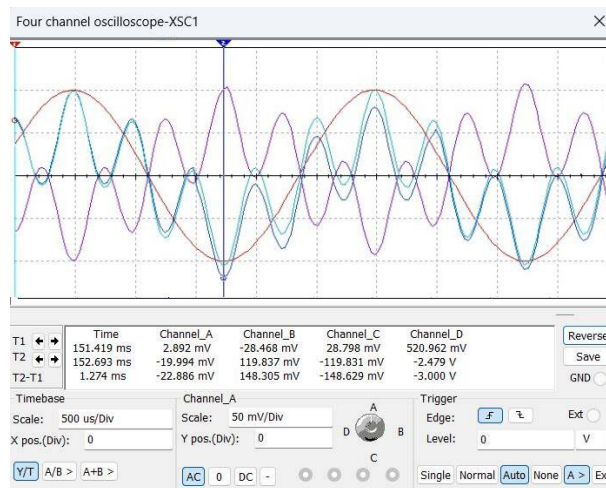
其中，环节间的电容 $C = 10\mu F$ 是高通滤波电容。

仿真验证如下。 u_{i1} 端输入一个 $f=1\text{kHz}$ 、幅值 $V_p=5\text{mV}$ 的电压信号， u_{i2} 端输入一个 $f=1\text{kHz}$ 、幅值 $V_p=100\text{mV}$ 的电压信号，用示波器测量输入端及各输出端的波形。（图1-mic_In 单路

测量，图 2-Line_In 单路测量，图 3-mic_In+Line_In 混合测量，图 4-mic_In+Line_In5kHz 混合测量）

（红-MIC_IN，紫-混放输出，蓝-音调调节器输出，青-功放输出）





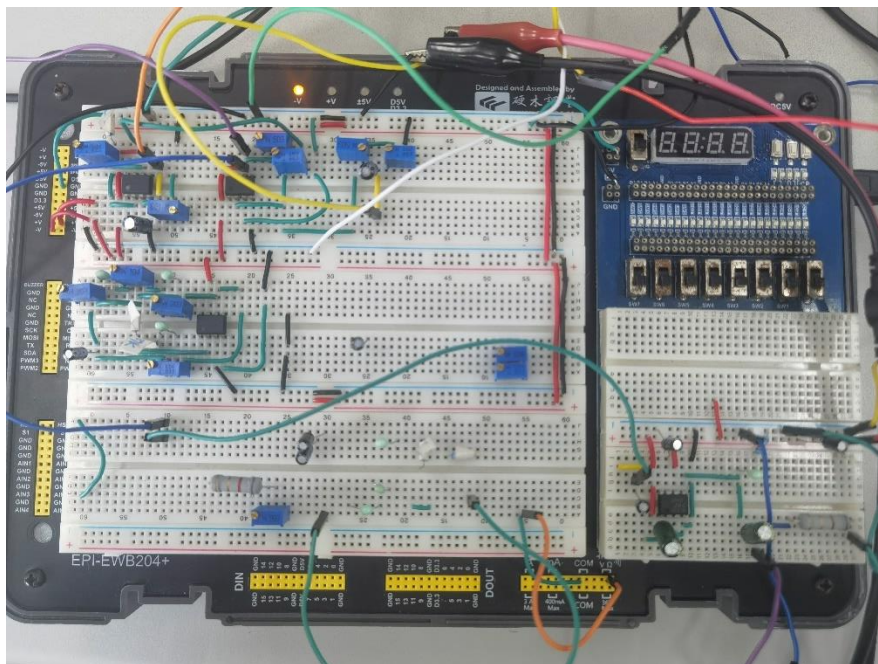
可以看到，功能基本正确。图 4 中，Line_In 输入为 20mV、5kHz 时，混合信号输出电压幅值约为 148mV，符合理论值。电路的总传输特性为

$$u_{o2} = -400u_{i1} - 100u_2$$

四、实验内容

3. 电路实验

电路搭接如下。



利用示波器测量各功能性能如下。（由于带载会导致放大倍数下降，会有两组参数：空载放大倍数为 400 的参数、带载放大倍数修改为 400 的参数。本报告选取的所测数据所有参数的调整均以使**得最终输出达到 2V 为准**）

同时，经测量， 8Ω 电阻实际值为 8.3Ω 。因此，欲使输出端同样获得 0.50W 的输出功率，实际输出电压应为

$$\sqrt{0.5W \cdot 8.3} = 2.037V$$

与 2V 相差不大。因此，仍可以 2V 作为最终输出标准。

纹波处理

实际实验时，电路产生了很大的纹波，在测量小信号（LINE_IN）时纹波尤为明显。给 LINE_IN 放大环节运放供电，即在各个输出环节中产生纹波，并放大到后级输出。经放大后的零输入纹波在功放输出端能达到几十 mV 的有效值。

实际采取了两种方法消除纹波。其一是供电的空间拓扑。采取了前三级易派供电 12V 电压、功放级由实验室电源供电 12V 的空间拓扑，二者共地，尽可能减小了纹波的产生。

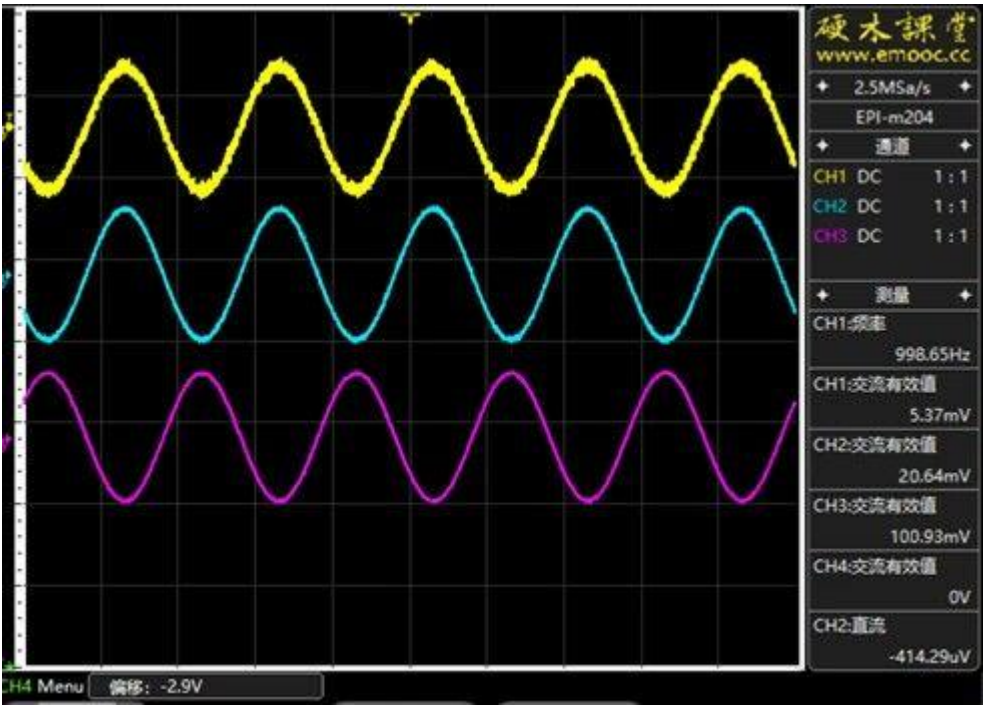
其二是滤波。这已在仿真中提及了。实际各级电路相连接时，并没有简单地直接耦合，而是采用了10μF电容进行容阻耦合，从而达到高通滤波的效果。经调整，由于第二级的电路纹波较大，且会被送到后级进行放大，所以第二级采取了两级RC环节进行滤波处理。

经纹波抑制后的电路能够较清晰地显示波形了。

MIC_IN 单路测量

分别测量 MIC IN、MIC 话音放大、MIC 混合前置放大、MIC 输出端的带8Ω负载输出电压波形参数，记录如下。

易派测量结果如下。输入有效值约为 5mV 的电压信号。



话音放大器实现了 4 倍放大，混合放大器实现了 5 倍放大，音调控制器实现了 1 倍放大。由于易派无法供给功放所需的功率，因此未显示该波形。

测量参数 · 易派测量		
测量对象	f/kHz	V _{rms} /mV
MIC IN	1	5.37
MIC 话音放大	1	20.64
MIC 混合前置放大	1	100.93
MIC 功放	1	/

实验室测量结果如下。

(紫-MIC_IN)



(黄-MIC 语音放大)



(黄-MIC 混合前置放大)



(紫-MIC 功放)



测量参数·实验室测量		
测量对象	f/kHz	V _{rms} /mV
MIC IN	1 kHz	5.17
MIC 语音放大	1 kHz	31.45

MIC 混合前置放大	1 kHz	104.6
MIC 功放	1 kHz	2.02V

该部分的理论值

理论参数		
测量对象	f/kHz	V _{rms} /mV
MIC IN	1kHz	5
MIC 话音放大		20
MIC 混合前置放大		100
MIC 功放		2V

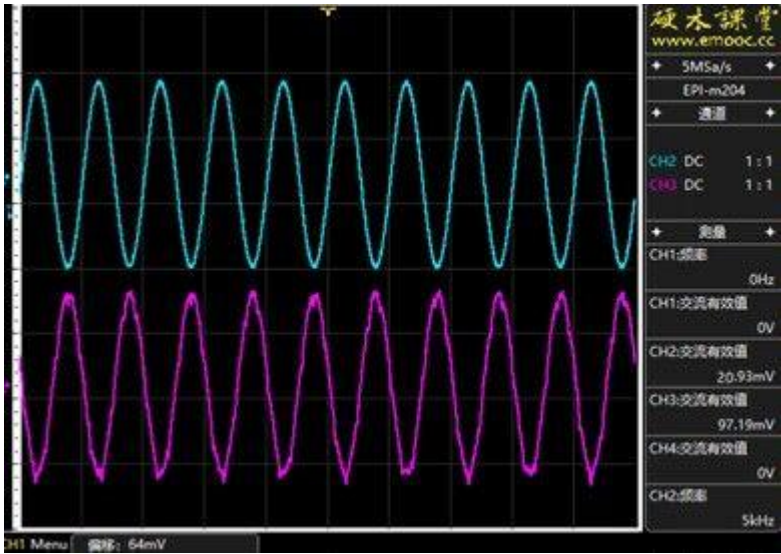
可以看到，第一级的输出有效值 31.45mV 是高于理论输出 20mV 的。这是因为由于带载，若保持原先的放大倍数，电路实际的有效值输出会低于 2V。因此，适当提高了第一级的放大倍数，使带载后的输出有效值能稳定在 2V。

而第二级的输出有效值 104.6mV 与理论输出 100mV 差别不大，说明带载对电路放大能力产生的影响是分散到两级间的，由于第二级输出本身较大，且调整的是第一级的放大能力，第二级实际受到的影响是相对较小的。

LINE_IN 单路测量

分别测量 MIC IN、MIC 话音放大、MIC 混合前置放大、MIC 输出端的带8Ω负载输出电压波形参数，记录如下。

易派测量结果如下。



混合放大器实现了 5 倍放大。

同样，由于易派无法供给功放所需的功率，因此未显示该波形。

测量参数 · 易派测量		
测量对象	f/kHz	V _{rms} /mV
LINE IN	5 kHz	20.93
LINE 混合前置放大	5 kHz	97.19
LINE 功放	5 kHz	/

实验室测量结果如下。

(黄-LINE 混合前置放大, 紫-LINE 功放)



测量参数 · 实验室测量		
测量对象	f/kHz	V_{rms}/mV
LINE IN	5 kHz	20
LINE 混合前置放大	5 kHz	127.7
LINE 功放	5 kHz	2.02

该部分的理论值

理论参数		
测量对象	f/Hz	V_{rms}/mV
LINE IN	5kHz	20
LINE 混合前置放大		100
LINE 功放		2V

同样，可以看到，第二级的输出有效值 127.7mV 是高于理论输出 100mV 的。这是因为由于带载，若保持原先的放大倍数，电路实际的有效值输出会低于 2V。且由于 LINE 线只经过了一级放大，其带载产生的电压降被集中到了混合前置放大级，**该级承担了带载的全部影响**，需要调整的电压较大。适当提高了第二级的放大倍数，使带载后的输出有效值能稳定在 2V。

MIC_IN + LINE_IN 混合

分别测量 MIC IN、MIC 话音放大、LINE IN、叠加混合前置放大的带8Ω负载输出电压波形参数，记录如下。

易派测量结果如下。



话音放大器实现了 4 倍放大，叠加后放大约为 148mV，符合理论。

同样，由于易派无法供给功放所需的功率，因此未显示该波形。

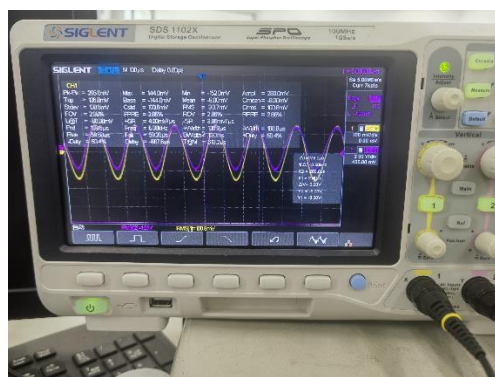
测量参数 · 易派测量		
测量对象	f/kHz	V _{rms} /mV
MIC IN	1kHz	5.33
MIC 话音放大	1 kHz	20.67
LINE IN	1 kHz	/
叠加混合前置放大	1 kHz	146.6

实验室测量结果如下。

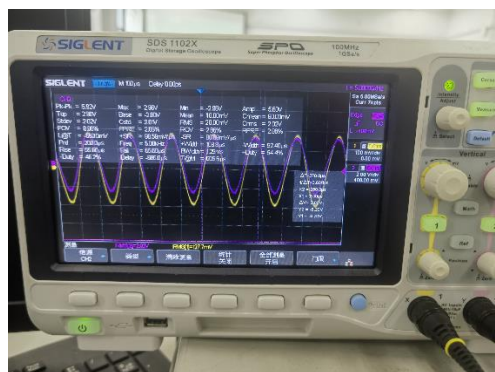
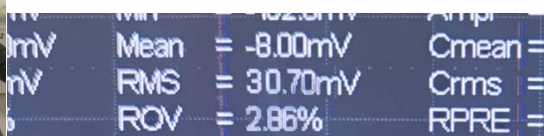
(黄-MIC IN)



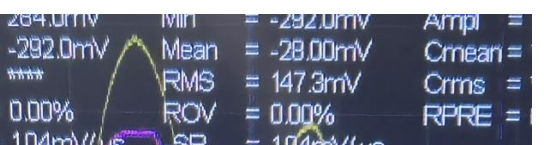
(黄-MIC 话音放大)



(紫LINE_IN)



(黄-叠加混合前置放大, 紫-功放)



由于功放输出产生顶部失真, 故未计入有效数据。

测量参数 · 实验室测量		
测量对象	f/kHz	V _{rms} /mV
MIC IN	1kHz	5.07
MIC 语音放大	1kHz	30.70
LINE IN	5kHz	20.00
叠加混合前置放大	/	147.3

该部分的理论值

测量参数		
测量对象	f/kHz	V _{rms} /mV
MIC IN	1kHz	5
MIC 语音放大		20
LINE IN	5kHz	20
叠加混合前置放大	/	148

可以看到,混合输出约为 **147.3mV**,与理论值非常接近.MIC 语音放大的输出 30.70mV,符合 MIC 单路测量的实验值。

同时,可以看到,最终功放的输出波形产生了略微的失真 (**顶部削平**)。这是功放的**供电电压**导致的。(实际在实验室对 LM386 单独用一台直流源供电,由 12V 增大供电电压,输出波形削平部分会逐渐变小直至消失)

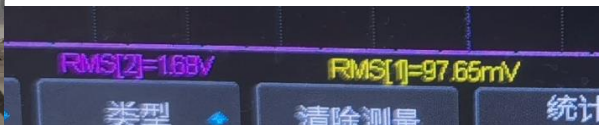
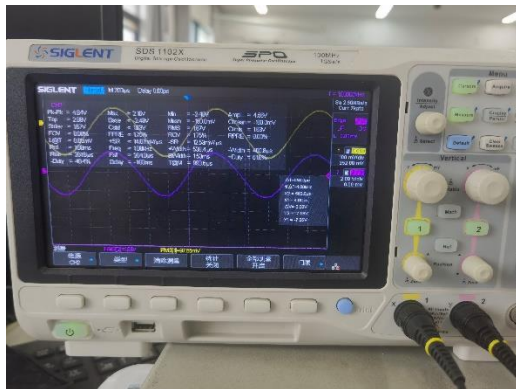
效率测量

分别测量 $u_i = 50mV_{rms}$ 、 $u_i = 100mV_{rms}$ 的带8Ω负载输出电压波形参数。
 $u_i = 50mV_{rms}$:
(黄-输入, 紫-输出)





$u_i = 100\text{mVrms}$:
(黄-输入, 紫-输出)



计算电源功率及效率，记录如下。(电阻以测量值 8.3Ω 为准)(褐色数据为计算数据)

u_i/mVrms	u_o/Vrms	增益	输出功率 (mW)	电源电流 (mA)	电源功率 (mW)	效率
50	875.9	17.39	92.43	60.1	721.2	12.82%
100	1.68V	17.20	320.73	88.1	1057.2	30.34%

其中，电源功率 $P_V = U_S \times I_S$ ， U_S 、 I_S 分别为电源供电电压与输出电流；效率 $\eta = \frac{P_o}{P_V} \times 100\%$ 。

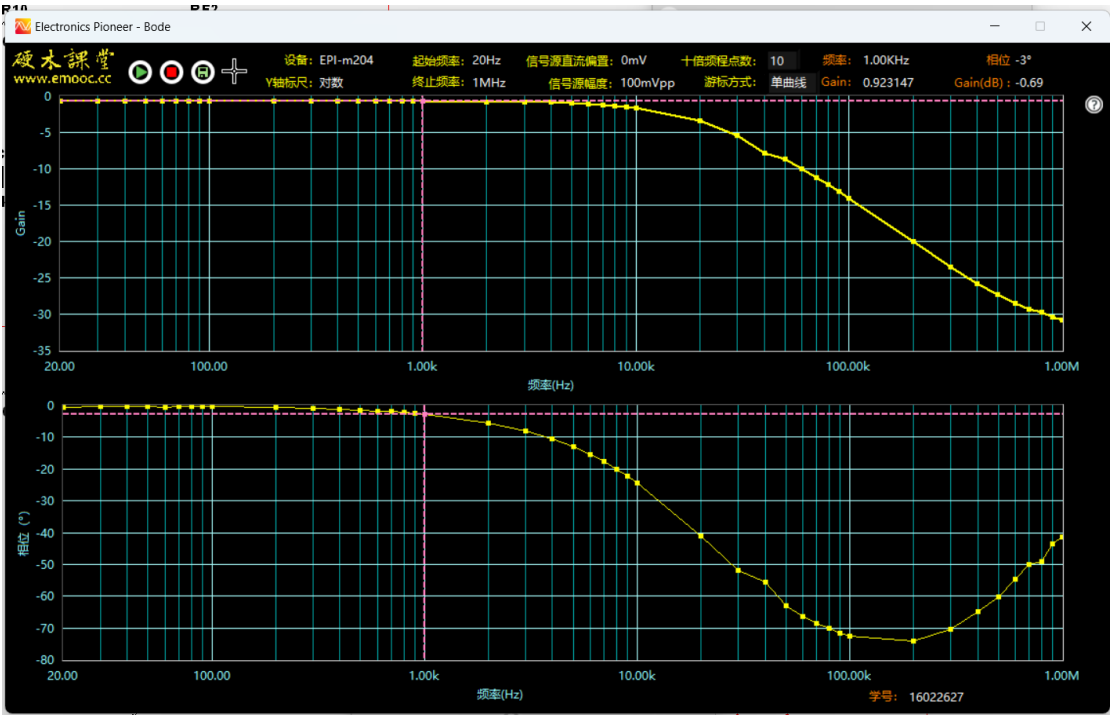
电源电压 U_S 取标称值 12V（实际约为 11.9V，误差可以忽略，方便计算）。

可以看到，本实验中 LM386 级的功放电路的电路效率并不是很高。推测能量主要耗散在了**功放芯片LM386 内**（由于实际实验时它很烫）。

音调可调电路测量

测量高、低音调音极点的幅频特性曲线与极点频率处的增益，记录如下。

$R_{W1} = 50\%$ ， $R_{W2} = 50\%$ ：



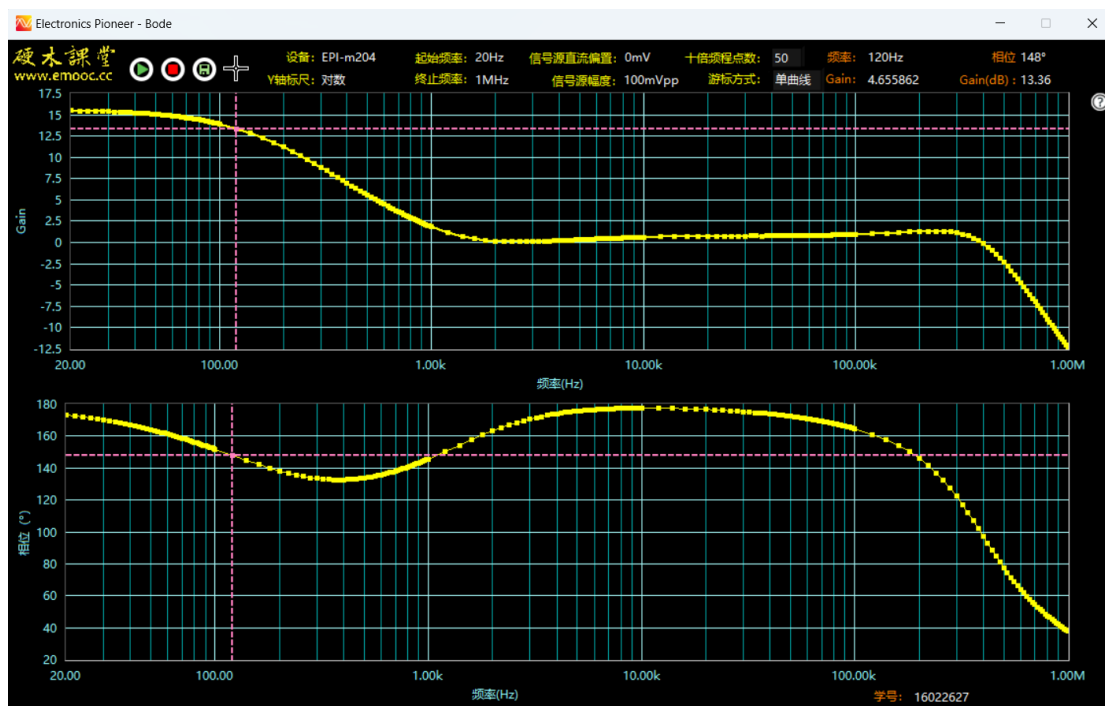
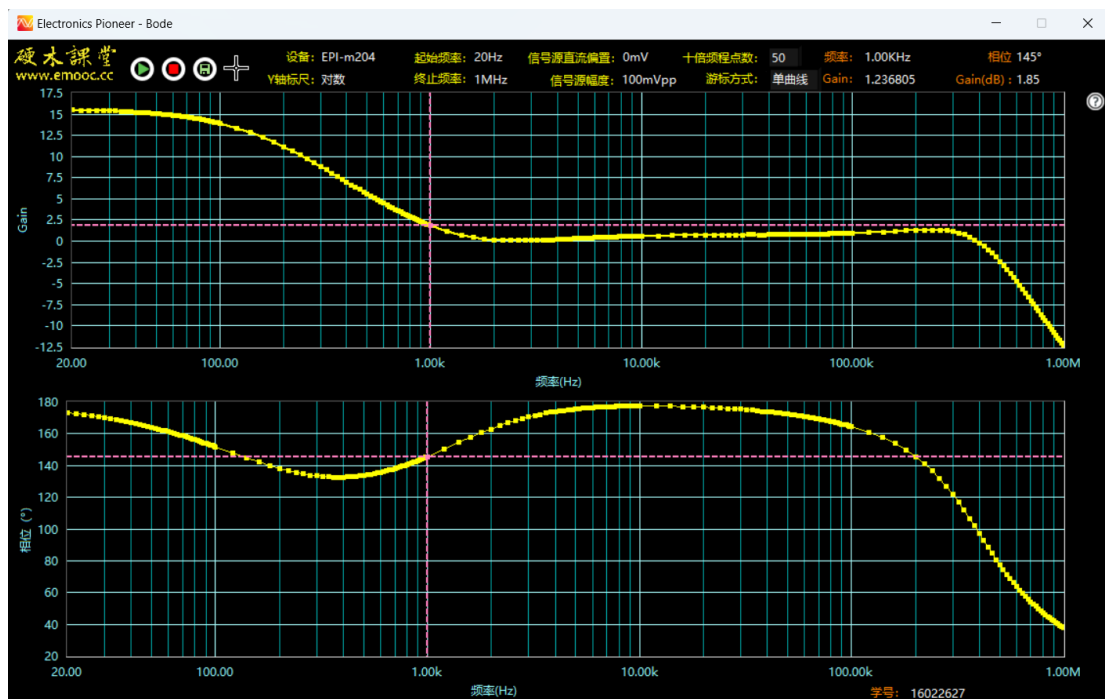
即

f/Hz	$f_M = 1kHz$
A_u/dB	-0.69

中频段的放大倍数约为 1 倍。

高音电位器：

$R_{W1} = 0\%$ ：

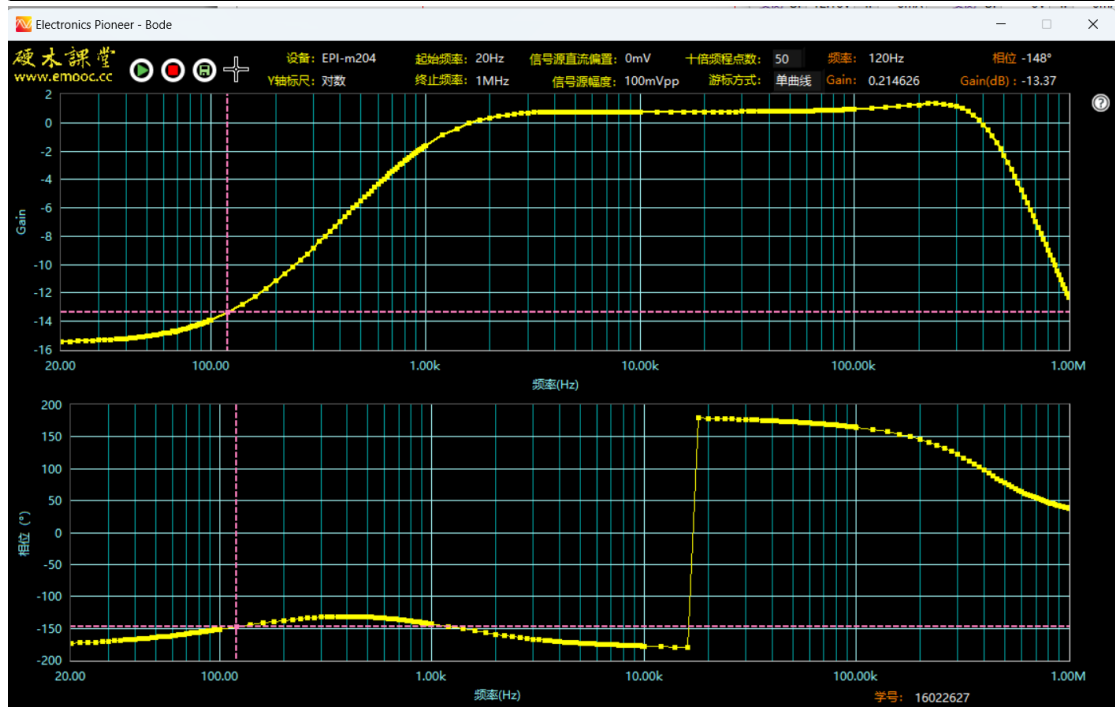
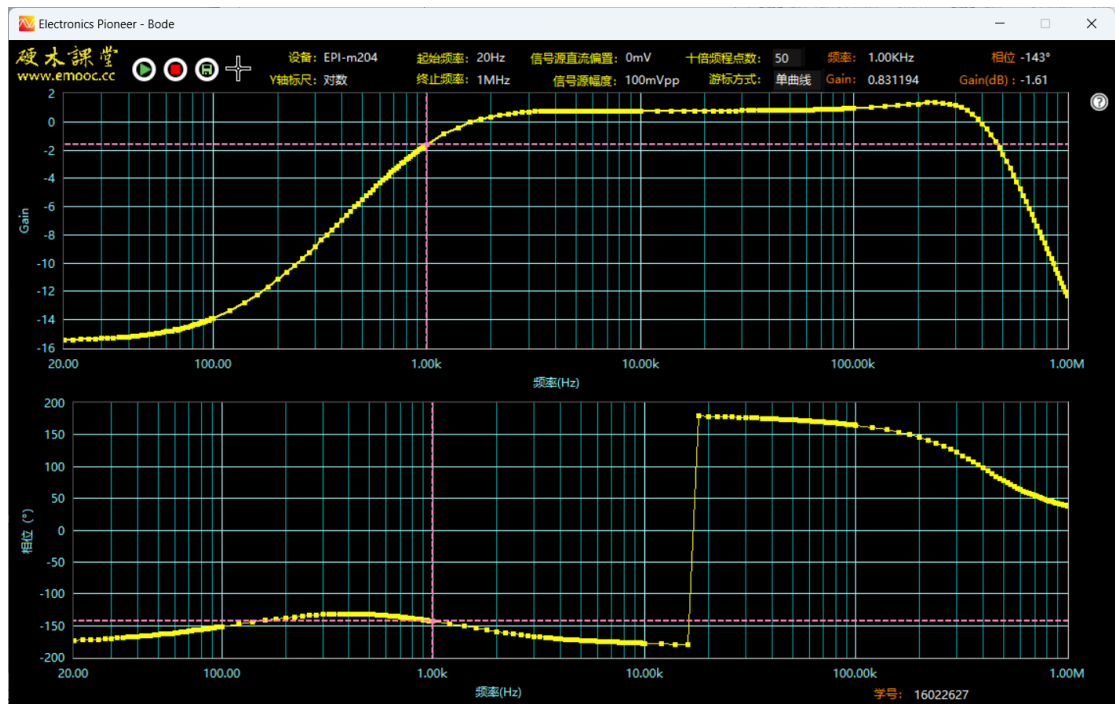


即

f/Hz	$f_L = 125Hz$	$f_M = 1kHz$
A_u/dB	13.36	1.85

13.36>12, 1.85≈ 0, 满足标称。

$R_{W1} = 100\%$:



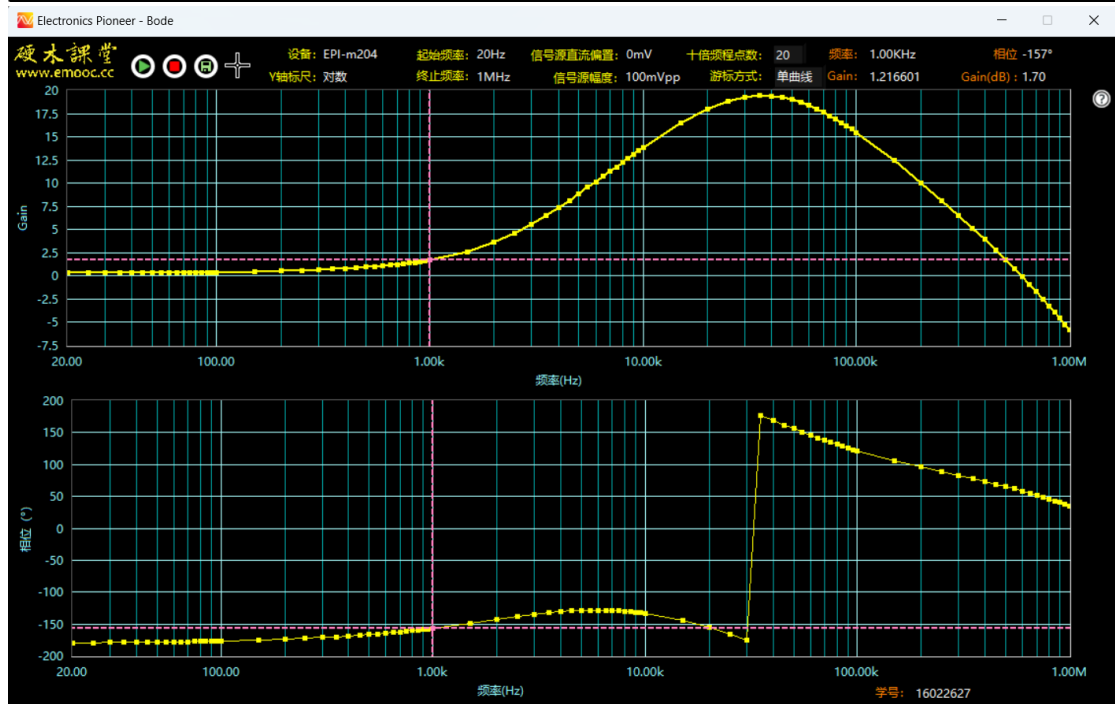
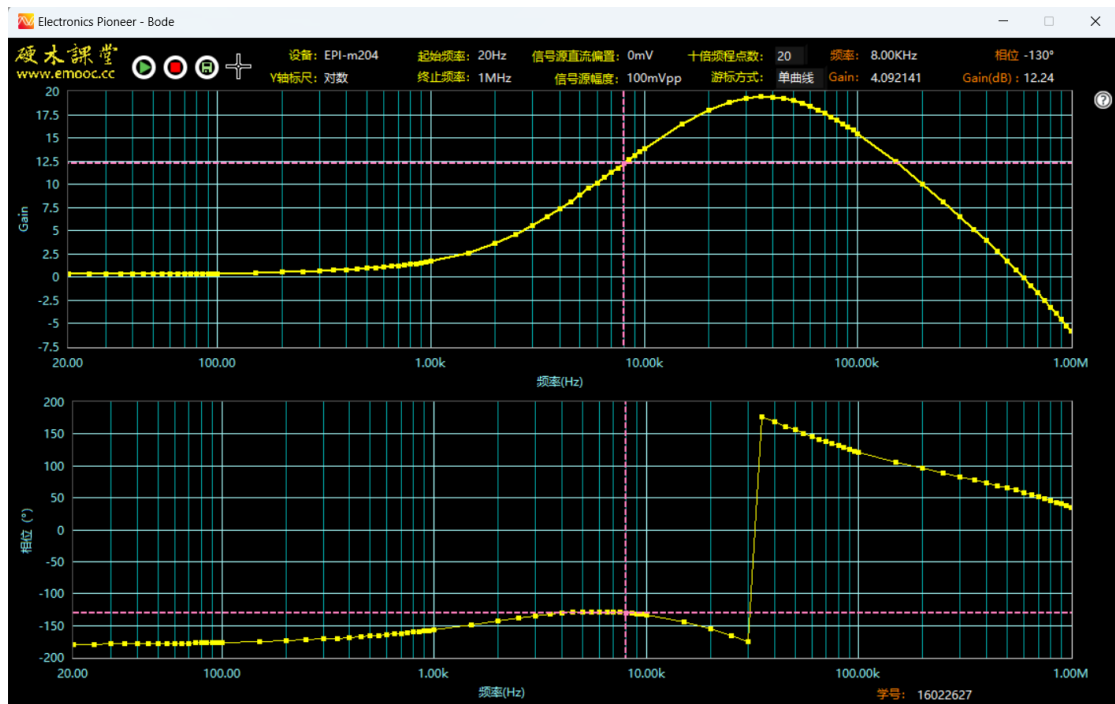
即

f/Hz	$f_L = 125\text{Hz}$	$f_M = 1\text{kHz}$
A_u/dB	-13.37	-1.61

-13.37 < 12, -1.61 ≈ 0, 满足标称。

低音电位器:

$$R_{W2} = 0\%:$$

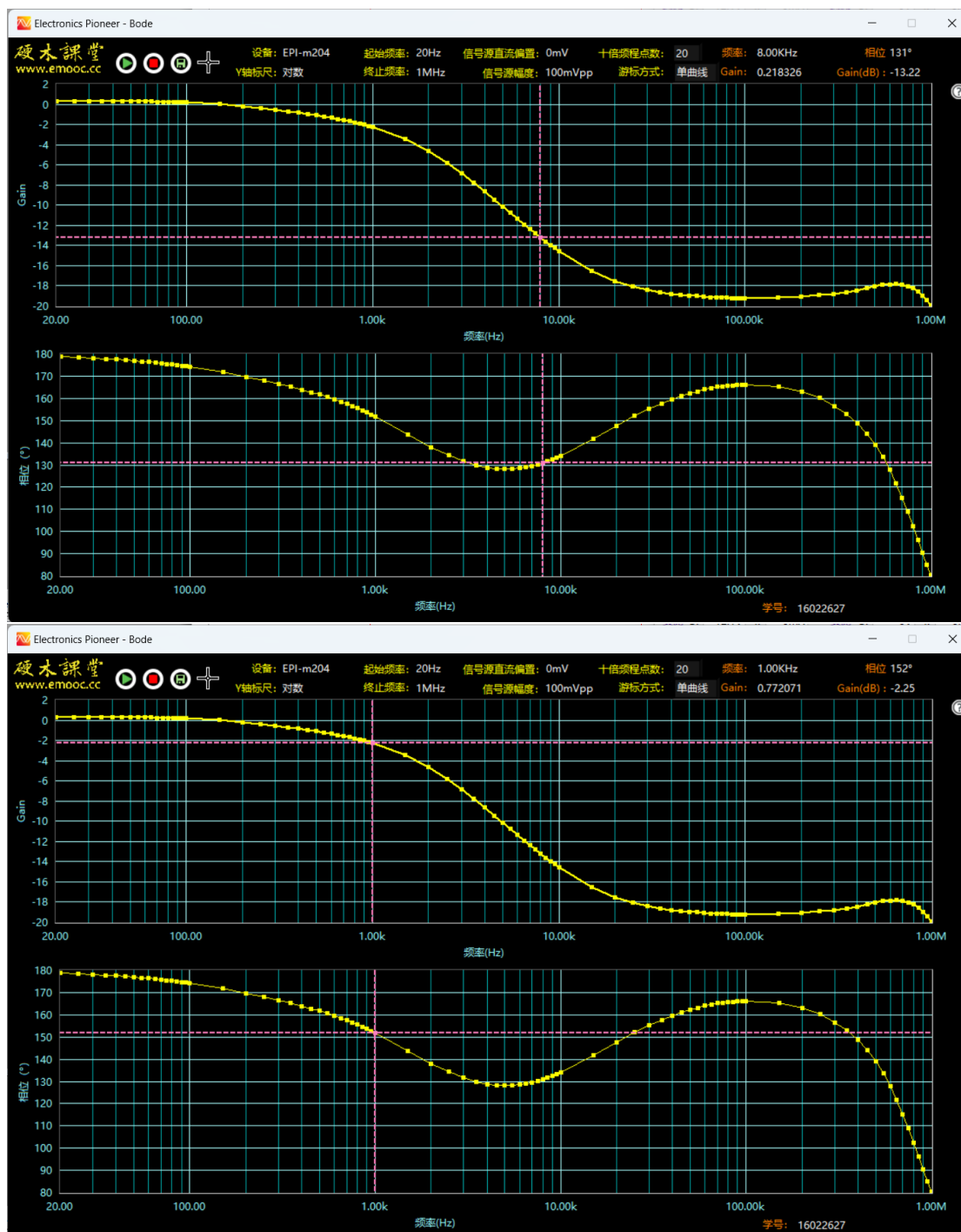


即

f/Hz	$f_H = 8\text{kHz}$	$f_M = 1\text{kHz}$
A_u/dB	12.24	1.7

12.24>12, 1.7≈ 0, 满足标称。

$R_{W2} = 100\%$:



即

f/Hz	$f_H = 8\text{kHz}$	$f_M = 1\text{kHz}$
A_u/dB	-13.22	-2.25

-13.22 < -12, -2.25 ≈ 0, 满足标称。

上述实验说明, 音调调节电路在空载时能满足设计的需求。由于音调调节电路的作用是相移, **带载不会对其相移能力产生影响(即使带的不是阻性负载)**, 因此可以认为带载后音调调节电路满足设计需求。

五、实验总结

本次实验是最后一次实验。这次实验花的时间比想象中少，不过也挺多的。我本以为这次实验大部分时间会花在电路设计上，就像上学期数电实验一样，由于数电最后一个实验是软件向的，当时花了三周去设计电路并附加功能。本次实验花费时间最多的反而是实际电路的调试。这次实验的电路设计并没有太难，从设计、计算参数到实际完成搭接和易派测量，一共只花了四天（还要包括搓预习报告的表格和流程图，这很快了！）。这次实验真正花时间的地方反而在自激振荡的调试。我是在周一中午 12 点去的实验室 401，呆到了下午 15:35 去上课，17:50 又来实验室，直到晚上 21:00 才调试好滤波部分，使得电路能相对不那么自激（那时我甚至还没有测频率响应！）。

个人感觉本实验是设计得比较成功的一个实验。大抵是因为本实验原理上并没有太复杂，能做出实际应用的成品，又非常典型地反映了理论没有太多要求、但实际工程非常典型的问题，比如相移导致自激，比如接地。比较可惜的是课上没有验收试听，课后也只是简单地玩了一下自己的电路。还挺期待能混音出来的呢，但只有一根数据线了，没有麦。